

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-185-196

ПОЛИМЕРНОЕ ПЛЕНОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СЛОЕМ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПКМ ВЕРТОЛЕТНОЙ ТЕХНИКИ

А.Г. Гуняева¹, О.Н. Клименко¹, С.И. Мишкин¹, А.И. Ткачук¹, Г.А. Акомелков²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Обособленное подразделение акционерного общества «31 Государственный проектный институт специального строительства» «Научно-испытательный центр 26 Центрального научно-исследовательского института», Санкт-Петербург, Россия; op26cnii@gmpi.spb.ru

Аннотация. Рассмотрены подходы к молниезащите конструкций вертолетной техники из полимерных композиционных материалов. Показана новая разработка НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ – молниезащитное покрытие марки ВМЗП-3, представляющее собой выравнивающую композиционную пленку с интегрированным металлическим слоем, с возможным использованием перфорированных фольг или вязаных проволочных сеток различной поверхностной плотности, в том числе со стеклянной подложкой. Приведены основные свойства разработанного молниезащитного покрытия марки ВМЗП-3 и результаты испытаний элементарных образцов на молниестойкость.

Ключевые слова: молниезащита, полимерные композиционные материалы, углепластик, углеродный наполнитель, металлические перфорированные фольги, металлические вязаные проволочные сетки, композиционные выравнивающие пленки, вертолет

Для цитирования: Гуняева А.Г., Клименко О.Н., Мишкин С.И., Ткачук А.И., Акомелков Г.А. Полимерное пленочное покрытие с интегрированным металлическим слоем для защиты от молниевых разрядов элементов из ПКМ вертолетной техники // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 185–196. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-185-196.

Scientific article

POLYMER FILM COATING WITH AN INTEGRATED METAL LAYER FOR PROTECTION AGAINST LIGHTNING DISCHARGES OF HELICOPTER EQUIPMENT ELEMENTS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIAL (PCM)

A.G. Gunyaeva¹, O.N. Klimenko¹, S.I. Mishkin¹, A.I. Tkachuk¹, G.A. Akomelkov²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Separate Division of a Joint-Stock Company «31 State Design Institute for Special Construction» «Research Center 26 Central Research Institute», Saint Petersburg, Russia; op26cnii@gmpi.spb.ru

Abstract. The article considers various approaches to lightning protection of helicopters structures made of PCM. A new development of the Kurchatov Institute – VIAM is presented: a lightning-protection coating of VMZP-3 grade, which is a leveling composite film with an integrated metal layer. It can be used with perforated foils or knitted wire sieves of various surface densities, including those with a glass fabric substrate. The main properties of the developed VMZP-3 lightning-protection coating and the results of tests of elementary samples for lightning resistance are given.

Keywords: lightning protection, polymer composite materials, carbon fiber reinforced plastic (CFRP), carbon filler, perforated metal foils, knitted metal wire sieve, composite leveling films, helicopter

For citation: Gunyaeva A.G., Klimenko O.N., Mishkin S.I., Tkachuk A.I., Akomelkov G.A. Polymer film coating with an integrated metal layer for protection against lightning discharges of helicopter equipment elements made of polymer composite material (PCM) // *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 185–196. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-185-196.

Введение

Современное материаловедение находится на этапе интенсивного развития, ключевыми векторами которого являются разработка и масштабное внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ). По аналогии с самолетами в конструкции вертолетов нового поколения доля ПКМ неуклонно увеличивается, достигая уже ≥ 50 % от общей массы фюзеляжа, а по площади внешней поверхности – до 80 % [1]. Лопасты несущих и рулевых винтов, капоты двигательных отсеков, элементы фюзеляжа и хвостовые балки – это только часть элементов и агрегатов, где основные классы ПКМ (угле- и стеклопластики) уверенно вытесняют металлы и их сплавы [2, 3]. Конечно, это уже известный факт, что такой стремительный переход к применению композиционных материалов обусловлен их выраженными преимуществами: высокие показатели удельной прочности и жесткости, снижение массы конструкции (до 25 %) и трудоемкости ее изготовления (до 30 %), коррозионная стойкость и др. [4].

Однако применение ПКМ в вертолетной технике приводит к возникновению новых проблем, одной из которых является необходимость обеспечения молниезащиты. Такие материалы обладают на 3–4 порядка более высокими значениями удельного электрического сопротивления, чем металлы, являющиеся хорошими проводниками, обеспечивающие высокую проводимость и, соответственно, растекание тока молнии по их поверхности с минимальными локальными повреждениями [1]. Углепластики, широко применяемые в несущих конструкциях вертолетной техники, несмотря на содержание токопроводящего углеродного наполнителя, занимают промежуточное положение между диэлектриками (стекло- и органопластками) и металлами. Однако полимерная матрица, как правило, является диэлектрической, в результате электрический ток, возникающий при попадании молнии, не может распределяться по углепластику так же эффективно, как по металлической конструкции. Это приводит к локальному повышению плотности тока, интенсивному нагреву и выделению большого количества тепловой энергии – температура канала молнии может достигать 30000 °С, амплитуда тока – до 200 кА [1]. При попадании молнии в особо опасные зоны незащищенные конструкции из ПКМ получают необратимые повреждения – происходят разрушение и вырыв волокон, выгорание лакокрасочного покрытия и связующего, расслоение композита, сквозной пробой. Например, при попадании молнии в топливные баки происходит воспламенение топлива, что вызывает отказ силовых элементов, а следовательно, приводит к возможной авиакатастрофе [1, 5].

Согласно статистике гражданской авиации, на 2000–3000 ч налета приходится в среднем один удар молнии, что делает проблему молниезащиты летательных аппаратов повседневной инженерной задачей. Для вертолетной техники, которая эксплуатируется в широком диапазоне высот и метеоусловий, включая активную грозовую деятельность, эта проблема является актуальной. При этом нормативные требования к молниезащищенности винтокрылых аппаратов регламентируются Авиационными правилами АП-29 «Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории» (п. 29.610 «Защита от молнии и статического электричества»), что также подтверждает необходимость разработки и сертификации молниезащитных систем для обеспечения безопасности полетов [6].

Основная задача молниезащиты для ПКМ заключается в создании внешнего проводящего пути, способного принять значительную часть импульсного тока и равномерно перераспределить его по поверхности конструкции летательного аппарата.

Традиционным способом защиты композиционных конструкций из ПКМ, в том числе вертолетной техники, является применение металлических сеток, фольг или напыленных металлических покрытий. Однако использование сплошных металлических элементов увеличивает массу конструкции, а металлические сетки требуют дополнительных технологических операций при изготовлении композиционных деталей и агрегатов [7, 8]. В связи с этим одним из перспективных направлений исследований в области молниезащиты летательных аппаратов является разработка облегченных композиционных пленочных систем, в которых металлический проводящий слой интегрирован непосредственно в полимерную пленку. Современным этапом развития технологий стало создание тонких пленочных систем, т. е. переход от одного проводящего слоя к многослойным системам, в которых проводящий компонент объединяется с полимерной матрицей, в том числе с армирующим наполнителем [9].

Специалисты НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ ведут работы по созданию композиционных молниезащитных пленок марок ВМЗП-1, ВМЗП-2 и ВМЗП-3 применительно к ПКМ с различными температурами переработки и областями применения. Например, разработанное полимерное пленочное покрытие с интегрированным металлическим слоем марки ВМЗП-1 предназначено для защиты от молниевых разрядов и снятия статического электричества с внешней аэродинамической поверхности летательных аппаратов, работающих в диапазоне температур от -60 до $+120$ °С, кратковременно – до $+150$ °С. Покрытие совместимо в едином цикле формования с препрегами на основе связующего ВСЭ-1212: препрегами углепластиков типа ВКУ-29, ВКУ-39, ВКУ-25, применяемыми в мотогондоле двигательных установок ПД-8 и ПД-14.

В первую очередь, композиционные полимерные молниезащитные пленки должны иметь химическую совместимость и адгезию к ПКМ, для которого они предназначены [9, 10]. Связующее пленки должно химически взаимодействовать с матрицей основного материала конструкции для формирования прочных химических связей и обеспечения возможности переработки в едином цикле формования по одному температурному режиму. Невозможно использовать универсальную композиционную пленку: адгезия будет слабой, под действием высокой температуры и ударной волны, вызываемой молниевым разрядом, слой защиты отслоится. Именно поэтому для каждого типа ПКМ создают свою молниезащитную пленку, а ее формование в едином цикле с изделием обеспечивает надежность, минимальную массу и технологическую эффективность [11].

Цель работы – оценить молниестойкость образцов углепластика типа ВКУ-45 с применением молниезащитного полимерного пленочного покрытия с интегрированным металлическим слоем марки ВМЗП-3, в том числе с подложкой на основе стеклянного наполнителя.

Материалы и методы

Полимерное пленочное покрытие с интегрированным металлическим слоем марки ВМЗП-3 (рис. 1) в составе ПКМ применимо в качестве выравнивающего поверхностного слоя, для защиты от молниевых разрядов и снятия статического электричества с внешней аэродинамической поверхности летательных аппаратов, работающих в диапазоне температур от -60 до $+80$ °С, кратковременно – до $+100$ °С, и совместимо в едином цикле формования с препрегами углепластиков типа ВКУ-45 на основе связующего ВСЭ-34.

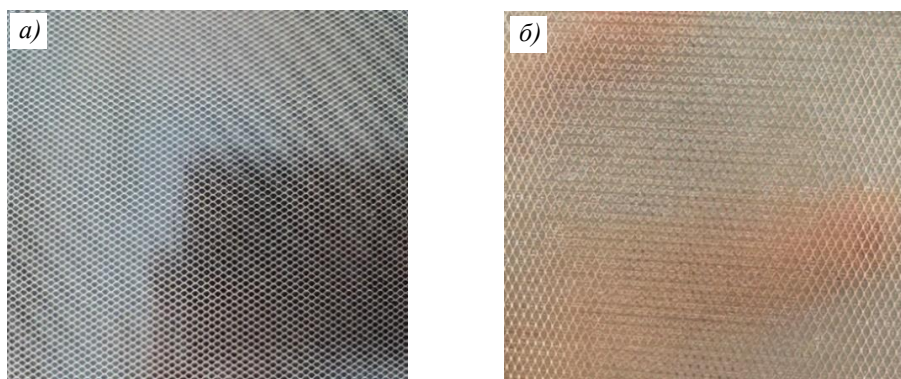


Рис. 1. Внешний вид полимерного пленочного покрытия с интегрированным металлическим слоем марки ВМЗП-3 без подложки на основе стеклянного наполнителя (а) и с ее использованием (б)

В зависимости от требований заказчика молниезащитное полимерное покрытие марки ВМЗП-3 изготавливается с различными типами вязаных и вязано-паяных сеток из медной металлической проволоки и просечно-вытяжных (перфорированных) медных металлических фольг (табл. 1), в том числе с использованием подложки на основе стеклянного наполнителя – ткани Т-64 (ТУ 5952-009-16319666–98) с поверхностной плотностью $\sim 100 \text{ г/м}^2$. Различия в структуре металлических слоев приведены на рис. 2.

Для полимерной основы молниезащитного покрытия марки ВМЗП-3 разработано расплавное эпоксидное связующее марки ВСЭ-87, обеспечивающее необходимые значения температуры стеклования в отвержденном состоянии ($145\text{--}155^\circ\text{C}$), что гарантирует рабочую температуру $\geq 80^\circ\text{C}$. Необходимый уровень вязкости не позволяет связующему (в составе полимерного пленочного покрытия с интегрированной металлической сеткой) вытекать из сетки и равномерно растекаться по поверхности препрегов при их совмещении с покрытием. Массовая доля связующего в покрытии составляет $55 \pm 10\%$.

Покрытие марки ВМЗП-3 изготавливают на специализированной установке методом совмещения (прикатки) металлического слоя сетки (фольги) с расплавным эпоксидным связующим и подложкой на основе стеклянной ткани (при необходимости), бумажной подложкой и полиэтиленовой защитной пленкой. Покрытие поставляется в рулоне.

Таблица 1

Поверхностная плотность вязаных и вязано-паяных сеток из медной металлической проволоки и просечно-вытяжных (перфорированных) медных металлических фольг

Материал	Марка	Поверхностная плотность, г/м^2
Вязаные и вязано-паяные медные сетки	СМПК-0,08	85
	СМПК-0,10	146
	СМПК-0,12	155
Просечно-вытяжные (перфорированные) металлические фольги	СФМ-051-84	73,3
	СФМ-051-76	107,4
	СФМ-076-79	141,6
	СФМ-076-70	195,3
	Streck Air R2 CuFA-51-73	73
	Streck Air R2 CuFA-51-107	107
	Streck Air R2 CuFA-76-142	142
	Streck Air R2 CuFA-76-195	195

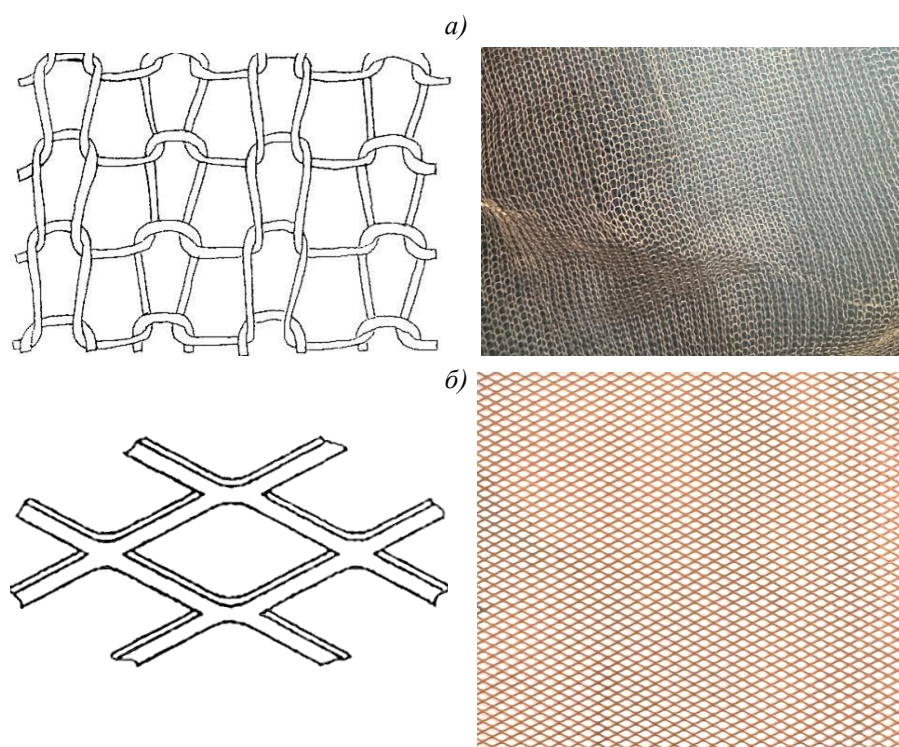


Рис. 2. Внешний вид вязаных и вязано-паяных сеток из металлической проволоки (а), проречно-вытяжных (перфорированных) металлических сеток (фольг) (б)

Значения поверхностной плотности молниезащитного полимерного пленочного покрытия с интегрированным металлическим слоем марки ВМЗП-3 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Поверхностная плотность молниезащитного полимерного пленочного покрытия с интегрированным металлическим слоем марки ВМЗП-3

Металлический слой	Поверхностная плотность, г/м ² , покрытия	
	без подложки на основе стеклянного наполнителя	с подложкой на основе стеклянного наполнителя
СФМ-051-84/Streck Air R2 CuFA-51-73	70–140	170–240
СМПК-0,08	70–160	170–260
СФМ-051-76/Streck Air R2 CuFA-51-107	90–200	190–300
СФМ-076-79/Streck Air R2 CuFA-76-142	120–260	220–360
СМПК-0,10	120–270	220–370
СМПК-0,12	130–290	230–390
СФМ-076-70/Streck Air R2 CuFA-76-195	160–360	260–460

Для проведения испытаний на молниестойкость за единый цикл формования изготовлены девять образцов (размерами 100×100 мм, толщиной 2,5–2,6 мм) углепластика типа ВКУ-45 на основе российских углеродных волокон и эпоксидного связующего марки ВСЭ-34 с молниезащитным покрытием марки ВМЗП-3 с интегрированным металлическим слоем марки СФМ-076-70 (поверхностная плотность 195,3 г/м²) и подложкой на основе стеклянной ткани марки Т-64 (рис. 3).



Рис. 3. Лицевая (а) и оборотная (б) стороны образца 1 для испытаний

При использовании одного слоя покрытия ВМЗП-3, в которое уже интегрирована металлическая сетка и подложка из стеклянного наполнителя, возможны повышение весовой эффективности (до 50 %) и снижение трудоемкости (до 30 %) в сравнении со стандартной схемой (два слоя клеевой пленки ВК-51, металлический слой и слой стеклянного наполнителя) сборки пакета заготовки изделия.

Испытания образцов на молниестойкость проводили согласно Авиационным правилам АП-29 «Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории» (п. 29.610 «Защита от молнии и статического электричества») и квалификационным требованиям КТ-160G/14G [12, 13]. Образцы углепластика с использованием полимерного пленочного покрытия ВМЗП-3 с интегрированным металлическим слоем и подложкой на основе стеклянного наполнителя подвергали воздействию высоковольтных импульсных разрядов, имитируя воздействие молниевых разряда для зон 2А, 1В и 2В. Каждая зона характеризуется параметрами воздействия, обусловленными вероятностью попадания молнии в конструкцию вертолета на земле и во время полета на разных высотах (рис. 4) [14].

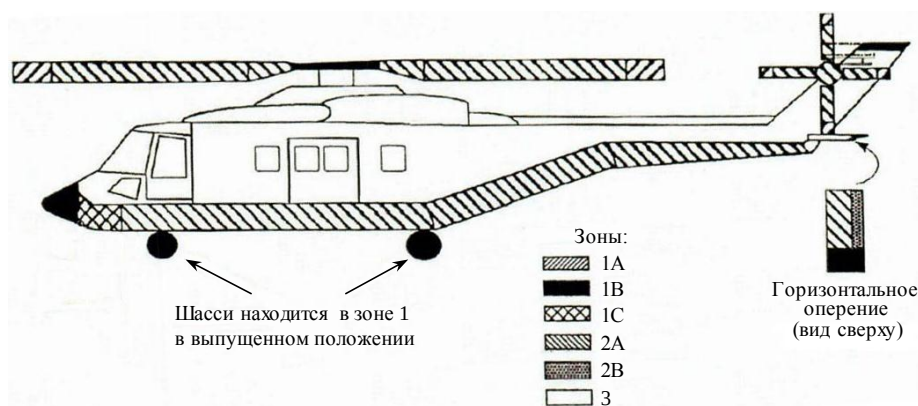


Рис. 4. Расположение зон поражения разрядом молнии на вертолете

Классификация зон поражения молнией вертолета основана на стандартах SAE ARP 5414B, ED-91F и Авиационных правилах АП-29:

– зона 1 – поверхности вертолета с высокой вероятностью первоначального касания молнии (прямого попадания молнии). Зоны 1А и 1В имеют низкую (носовая часть, законцовки несущего и рулевого винтов) и высокую (нижняя часть фюзеляжа в режиме полета) вероятность «зависания» дуги соответственно;

– зона 2 – поверхности вертолета с высокой вероятностью смещения канала молнии потоком воздуха из зоны 1А. Зоны 2А и 2В имеют низкую и высокую вероятность «зависания» канала молнии соответственно;

– зона 3 – поверхности вертолета, не включенные в перечисленные зоны, с низкой вероятностью прямого попадания или касания канала молнии, но через эту зону могут протекать большие токи между точками присоединения [15, 16].

На основании данных, полученных от потенциального потребителя, выбраны параметры воздействия на образцы импульсов главного разряда (компонент А), промежуточного тока (компонент В), продолжительного тока (компонент С), продолжительного тока в зонах перемещения канала при малых задержках (С*) и повторного удара молнии (компонент D), имитирующих воздействие разряда молнии для зон 2А, 1В и 2В (табл. 3).

Таблица 3

Параметры воздействия сочетаний различных факторов

Компонент воздействия	Параметры компонентов	Значения параметров
Зона 2А		
D	Пиковая амплитуда тока, кА	100 ($\pm 10\%$)
	Время возрастания, мкс	≤ 25
	Полное время действия импульса, мкс	≤ 500
	Интеграл действия $\int i^2 dt$, $A^2 \cdot c$	$0,25 \cdot 10^6$ ($\pm 20\%$)
B	Усредненная амплитуда тока, кА	2 ($\pm 20\%$)
	Длительность тока, мс	5 ($\pm 10\%$)
	Переносимый заряд, Кл	10 ($\pm 10\%$)
C*	Усредненная амплитуда тока, А	≤ 400
	Длительность тока, мс	45 ($\pm 20\%$)
	Переносимый заряд, Кл	18 ($\pm 20\%$)
Зона 1В		
A	Пиковая амплитуда тока, кА	200 ($\pm 10\%$)
	Время возрастания, мкс	≤ 50
	Полное время действия импульса, мкс	≤ 500
	Интеграл действия $\int i^2 dt$, $A^2 \cdot c$	$2 \cdot 10^5$ ($\pm 20\%$)
B	Усредненная амплитуда тока, кА	2 ($\pm 20\%$)
	Длительность тока, мс	5 ($\pm 10\%$)
	Переносимый заряд, Кл	10 ($\pm 10\%$)
C	Усредненная амплитуда тока, А	От 200 до 800
	Длительность тока, с	От 0,25 до 1,00
	Переносимый заряд, Кл	200 ($\pm 20\%$)
D	Пиковая амплитуда тока, кА	100 ($\pm 10\%$)
	Время возрастания, мкс	≤ 25
	Полное время действия импульса, мкс	≤ 500
	Интеграл действия $\int i^2 dt$, $A^2 \cdot c$	$0,25 \cdot 10^6$ ($\pm 20\%$)
Зона 2В		
D	Пиковая амплитуда тока, кА	100 ($\pm 10\%$)
	Время возрастания, мкс	≤ 25
	Полное время действия импульса, мкс	≤ 500
	Интеграл действия $\int i^2 dt$, $A^2 \cdot c$	$0,25 \cdot 10^6$ ($\pm 20\%$)
B	Усредненная амплитуда тока, кА	2 ($\pm 20\%$)
	Длительность тока, мс	5 ($\pm 10\%$)
	Переносимый заряд, Кл	10 ($\pm 10\%$)
C	Усредненная амплитуда тока, А	От 200 до 800
	Длительность тока, с	От 0,25 до 1,00
	Переносимый заряд, Кл	200 ($\pm 20\%$)
Примечание. Компонент D должен подаваться первым.		

Исследования проводили с использованием генератора импульсных токов ГИТ-М, воспроизводящего компоненты А–D тока молнии [17]. Устройство крепления образцов и подвода тока молнии через воздушный промежуток от генератора импульсных токов к образцам приведено на рис. 5.

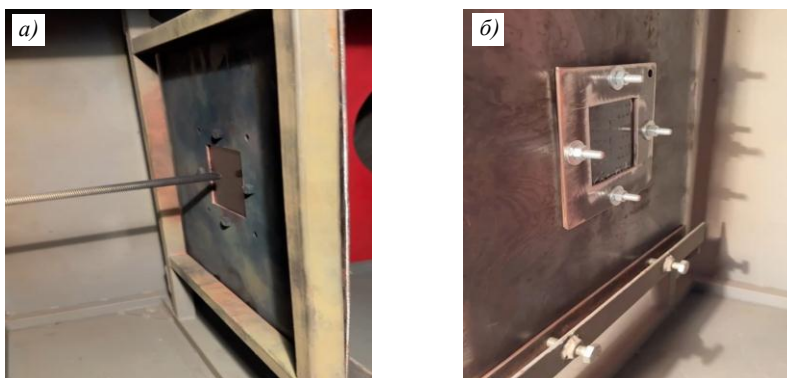


Рис. 5. Устройство крепления образцов: а, б – вид с лицевой и оборотной стороны образца соответственно

После извлечения образцов из устройства крепления проводили визуальный осмотр, замеры площади повреждения, анализ состояния образцов на предмет нарушения целостности, а также исследования высокочастотным эхоимпульсным методом путем сканирования преобразователем всей поверхности с целью определения образовавшихся внутренних дефектов [18].

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты испытаний образцов углепластика типа ВКУ-45
с молниезащитным покрытием марки ВМЗП-3 на молниестойкость**

Условный номер образца	Зона воздействия	Внешний вид верхней поверхности образца	Результаты исследования высокочастотным эхоимпульсным методом
1	2А	Деструкция связующего и молниезащитного покрытия, разрыв волокон углепластика диаметром от 9 до 33 мм. Сквозной пробой отсутствует	Площадь повреждения образцов составляет от 188 до 822 мм ² , глубина повреждения достигает 0,3–0,4 мм. Сквозной пробой отсутствует
6	1В	Деструкция связующего и молниезащитного покрытия, разрыв волокон углепластика диаметром от 35 до 37 мм, вырыв волокна в направлении 0 градусов. Сквозной пробой отсутствует	Площадь повреждения образцов составляет от 3374 до 4001 мм ² , глубина повреждения достигает 0,4–2,5 мм. Зафиксирован сквозной пробой
9	2В	Деструкция связующего и молниезащитного покрытия, разрыв волокон углепластика диаметром от 40 до 70 мм, вырыв волокна в направлении 0 градусов. Сквозной пробой отсутствует	Площадь повреждения образцов составляет от 2675 до 3374 мм ² , глубина повреждения достигает 0,4–0,5 мм. Сквозной пробой отсутствует

Внешний вид образцов 1, 6 и 9 после воздействия импульсом тока, соответствующим зонам 2А, 1В и 2В соответственно, приведен на рис. 6.



Рис. 6. Образцы углепластика с молниезащитным покрытием марки ВМЗП-3 после испытаний на молниестойкость

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что молниезащитное полимерное пленочное покрытие марки ВМЗП-3 с интегрированным металлическим слоем марки СФМ-076-70 работоспособно и может быть рекомендовано для применения в конструкциях авиационной техники, на которые в процессе эксплуатации воздействуют высоковольтные импульсные разряды молнии с параметрами, соответствующими зонам 2А и 2В. Данные образцы получили минимальные поверхностные повреждения, площадь и глубина залегания повреждений были небольшими, сквозной пробой отсутствовал.

Для возможности применения молниезащитного полимерного пленочного покрытия марки ВМЗП-3 с интегрированным металлическим слоем марки СФМ-076-70 в зоне 1В требуется проведение дополнительных исследований с использованием технологических решений при изготовлении конструкции, так как образцы имели обширную площадь, значительную глубину повреждений и сквозной пробой, что может негативно влиять на поведение конструкции из ПКМ в процессе эксплуатации авиационной техники после попадания в нее разряда молнии.

Заключения

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработано новое молниезащитное полимерное пленочное покрытие марки ВМЗП-3 для применения в качестве выравнивающего поверхностного слоя, защиты от молниевых разрядов и снятия статического электричества с внешней аэродинамической поверхности летательных аппаратов, работающих в диапазоне температур от -60 до $+80$ °С, кратковременно – до $+100$ °С. Покрытие совместимо в едином цикле формования с препрегами на основе связующего ВСЭ-34 (препрегами углепластиков типа ВКУ-45).

Проведены испытания на молниестойкость элементарных образцов согласно Авиационным правилам АП-29 «Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории» (п. 29.610 «Защита от молнии и статического электричества») и квалификационным требованиям КТ-160G/14G. Образцы углепластика с использованием полимерного пленочного покрытия ВМЗП-3 с интегрированным металлическим слоем СФМ-076-70 и подложкой на основе стеклянного наполнителя подвергали воздействию высоковольтных импульсных разрядов, имитируя воздействие молниевых разрядов для зон 2А, 1В и 2В.

По результатам испытаний разработанное покрытие рекомендовано для применения в конструкциях авиационной техники, на которые в процессе эксплуатации воздействуют высоковольтные импульсные разряды молнии в зонах 2А и 2В. Для возможности его применения в зоне 1В требуется использование дополнительных технологических решений при изготовлении конструкции.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н. Роль государственных научных центров РФ в обеспечении национальной безопасности страны // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 4–9.
4. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
5. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
6. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
7. Саженков Н.А., Саженков А.Н. Молниезащитные покрытия мотогондол двигателей из полимерных композиционных материалов. Часть 1. Анализ существующих типов молниезащит // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2021. № 67. С. 43–55.
8. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Вишняков Л.Р. Материалы для систем молниезащиты полимерных композиционных материалов. Особенности изготовления (обзор, часть I) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. № 9. С. 25–33.
9. Мишкин С.И., Клименко О.Н., Гуняева А.Г. Материалы для молниезащиты авиационной техники // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). С. 84–92. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 09.09.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92.
10. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
11. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Кривonos В.В. и др. Повышение трансверсальной проводимости конструкционных углепластиков, модифицированных фуллероидными наночастицами // Нанокompозиты: исследование, производство, применение. М.: ТорусПресс, 2004. С. 20–23.
12. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 70–80. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.09.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
13. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). С. 82–92. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
14. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
15. Гуляев И.Н., Клименко О.Н., Лонский С.Л., Славин А.В., Черфас Л.В. Определение состава и структуры полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 4 (81). С. 32–47. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.08.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-32-47.
16. Вешкин Е.А., Славин А.В., Постнова М.В., Апалькова А.В. Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 2 (79). С. 59–71. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.09.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.

17. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Славин А.В. Опыт применения полимерных композиционных материалов разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигательных установках для самолетов гражданского назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 82–94. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.09.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
18. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.

References

1. Kablov E.N. Marketing in Materials Science, Aircraft Manufacturing, and Industry: Present and Future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Kablov E.N. The Role of State Scientific Centers of the Russian Federation in Ensuring National Security. *Perspektivnyye tekhnologii dlya sistem bezopasnosti*, 2023, no. 1, pp. 4–9.
4. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New-Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
5. Kablov E.N. New-Generation Materials and Digital Technologies for Their Processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
6. Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
7. Sazhenkov N.A., Sazhenkov A.N. Lightning protection coatings for engine nacelles made of polymer composite materials. Part 1. Analysis of existing types of lightning protection. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2021, no. 67, pp. 43–55.
8. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Vishnyakov L.R. Materials for lightning protection systems for polymer composite materials. Manufacturing specifics (review, Part I). *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2023, no. 9, pp. 25–33.
9. Mishkin S.I., Klimenko O.N., Gunyaeva A.G. Materials for the lightnings protection of aviation engineering. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), pp. 84–92. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 09, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92.
10. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
11. Kablov E.N., Gunyaev G.M., Krivonos V.V. et al. Increasing the transverse conductivity of structural carbon-fiber-reinforced plastics modified with fulleroid nanoparticles. *Nanocomposites: Research, Production, Application*. Moscow: TorusPress, 2004, pp. 20–23.
12. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 70–80. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 01, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
13. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 82–92. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 04, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
14. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 04, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

15. Gulyaev I.N., Klimenko O.N., Lonskii S.L., Slavin A.V., Cherfas L.V. Determination of the composition and structure of polymer composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 4 (81), pp. 32–47. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 01, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-32-47.
16. Veshkin E.A., Slavin A.V., Postnova M.V., Apalkova A.V. The role of temperature-time curing conditions in the formation of unidirectional and equally strong carbon fiber plastics properties. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), pp. 59–71. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 01, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
17. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Experience in the use of polymer composite materials developed by NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in engines for civil aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 82–94. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 01, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
18. Belinis P.G., Donetskii K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.

Информация об авторах

Гуныева Анна Георгиевна, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Клименко Оксана Николаевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мишкин Сергей Игоревич, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткачук Анатолий Иванович, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Акомелков Геннадий Александрович, начальник отдела, к.т.н., ОП АО «31 ГПИСС» «НИЦ 26 ЦНИИ», op26cnii@gmpi.spb.ru

Information about the authors

Anna G. Gunyaeva, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oksana N. Klimenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey I. Mishkin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoly I. Tkachuk, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Gennady A. Akomelkov, Head of Division, Candidate of Sciences (Tech.), SD JSC «31 State Design Institute for Special Construction» «Research Center 26 Central Research Institute», op26cnii@gmpi.spb.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.10.2026.

The article was submitted 28.09.2026; approved and accepted for publication after reviewing 02.10.2026.